

兵庫県神戸市における脇浜第2測線の
反射法弾性波探査

遠藤秀典*・渡辺史郎**・牧野雅彦**・横田 裕***・
野田利一***・香川敏幸***

ENDO Hidenori, WATANABE Shiro, MAKINO Masahiko, YOKOTA Hiroshi, NODA Toshikazu and KAGAWA Toshiyuki (1996) Seismic reflection survey of Wakinohama-2 survey line in Kobe city, Hyogo Pref., Japan. *Bull. Geo. Surv. Japan*, vol.47(2/3), p.95-108, 9 figs., 2 tables, 2 plates.

Abstract : The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused very severe damage within a narrow zone in the coastal plain from Kobe city to Nishinomiya city. The seismic reflection survey of the Wakinohama-2 survey line near to the boundary between Chuo and Nada wards in Kobe city was conducted to reveal the subsurface geological structure of the coastal plain. This survey was aimed at the shallow subsurface structures, from the surface down to a depth of several hundreds meters, in order to document the cause of the earthquake damage. Two sets of 48 channels with offsets of 5-240 m and 125-360 m were alternately recorded in the seismic reflection survey. The interval between the geophone groups was 5 m, and the common-midpoint stack was 36.

The following conclusions were derived from the study. (1) The seismic profile shows that concealed faults exist below the shallow subsurface deposits around Japan Railway (JR) line, and at the southwestern corner of Oji Park. (2) The sediments within the block bounded by these faults dip steeply to the south, whereas the sediments outside the fault block are horizontal. (3) The discontinuity and humps of the reflection interfaces below the JR line show a reverse fault, dipping to the north. (4) A wide fracture zone, probably with some lateral displacement exists at the southwestern corner of Oji Park. (5) The accumulation of the fault movements can be recognized around the southern fault below the JR line. (6) Some horizons near to this fault show pinch out, which may indicate the occurrence of periodic, large fault movements. (7) A common feature in the reflection patterns outside the distorted fault block suggests a relatively young age for the large displacements caused by the Oji Park fault. (8) The comparison between the locations of the faults and the distribution map of damaged houses suggests that the Oji Park fault exists on the northern boundary of the severely damaged zone, to the north of which the extent of the houses damaged decreases sharply. The point at the surface extrapolated from the fault below the JR line corresponds to the area of reinforced concrete buildings and artificial structures with steel frames which were severely

* 環境地質部

** 地殻物理部

*** 阪神コンサルタンツ

Keywords : seismic survey, reflection survey, fault, earthquake, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Wakinohama, Kobe, Hyogo

damaged. These results suggest that there is a close relationship between the location of the concealed faults and the extent of the damages.

要 旨

平成7年兵庫県南部地震は、神戸市から西宮市付近にかけて、平地の中の帯状の地帯に著しい被害をもたらした。この被害に関する地下地質について検討するため、神戸市中央区と灘区の境界付近において脇浜第2測線の反射法弾性波探査を実施した。この探査は、地下数100m以浅を主な対象に、地下地質構造について詳しく検討できるように行った。特にこの測線では、発振点から受振点までの距離、オフセット距離5mからとともに125mからの記録も収録し、36重合の水平重合数が多い探査で行った。

この結果、次のことが明らかになった。1) JR線付近及び王子公園南西端付近の地下に、変位が浅部まで及んでいる断層が伏在して分布する。2) これらの断層に挟まれた範囲で地層は大きく南側に傾き、両側ではより水平である。3) これらの断層のうち海側のものは北傾斜の逆断層の変位を示す。4) 王子公園南西端付近では、破碎帯が幅広く分布するとともに、横擦れの変位を伴っている可能性がある。5) JR線付近の断層には、断層の活動に累積性が認められる。6) この断層付近には、反射面が尖滅(pinch out)する層準が認められ、これらが過去に大きな断層運動を生じた年代に対応している可能性がある。7) 2箇所の断層帯の両側の反射記録を比較すると、反射面の分布パターンには共通性が認められ、王子公園南西端付近の断層の大きな変位が比較的新しい地質年代に生じた可能性があることを示唆する。8) 家屋被害の分布と比較すると、王子公園南西端付近は、被害が急に少なくなる被害集中地帯の北側の境界付近に位置する。また、JR線付近の断層の地表への交点付近は、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物が多く、それらの大部分が大破する大きな被害を被っており、断層の分布と被害の分布が密接に関係していることを示唆する。

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震は、六甲山地と大阪湾岸との間の平地に、著しい被害をもたらした。この被害に地下地質条件の分布がどのように関係しているか、日本の都市の多くが立地する臨海平野の防災対策について検討するためにも明らかにしなければならない重要な課題であ

る。このため、本地域の地下地質について、反射法弾性波探査をはじめとする様々な調査を実施した(遠藤ほか、1995aなど)。

本稿では、それらのうち、神戸市中央区と灘区の境界付近で実施した脇浜第2測線の反射法弾性波探査について報告する。今回実施した反射法弾性波探査は共通反射点重合法によるものであり、現場の諸元が多くの要素からなり、解析にも多くの段階の処理が必要である。それらの詳しい内容、及び解析の各段階における処理結果について報告する。また、この探査結果から、今回の地震で被害が集中した平地に断層が伏在して分布することを指摘するとともに、そのセンスや活動に関して検討し地下地質構造の特徴について述べる。

なお、この測線の周辺では、脇浜公園における比較的短い測線(脇浜第1測線)の探査を1995年2月に実施している。また、S波による探査など数測線の探査を平成7年度に実施している。これらの結果については、別稿で改めて報告する。

2. 探査方法

2.1 調査位置

神戸市中央区と灘区の境界付近で実施した脇浜第2測線の測線の位置を第1図に示す。

六甲山の南東縁部の山際が分布する方向は、石屋川付近を境に、西側の南西-北東方向から東側の東西方向へ折れ曲がっている。本測線はその西側の地域に位置する。

隣接する家屋が少なく、また復旧工事等のできるだけ影響を及ぼさないよう、この付近では比較的公園が多い場所に測線を設定し、地震発生後間もない1995年3月に実施した。

大部分が舗装道路上であり、南端(第1発振地点)の海岸線付近から北端(最終受振地点)の海星女子学園北西側に至る南南東-北北西方向の測線である。なお、最終発振地点は、1,570m地点である。

2.2 現場計測の方法

探査の主要諸元の一覧表を第1表に示す。陸上における反射法弾性波探査の中では、比較的浅い深度(数100m以浅)を主な対象に、地下地質構造について詳しく探査する方法で行っている。



第1図 脇浜第2測線の位置を太い実線で示す。上図には北西から光を当てた場合に相当する陰影表示で地形の傾斜を示す。下図の数字は第1発振地点からの距離(m)。下図には国土地理院発行の25,000分の1地形図「神戸首部」を使用。

Fig. 1 Thick line show the Wakinohama-2 survey line. The upper map shows shaded relief topographic map, illuminated from the northwest. The lower map shows details of the survey line, where numbers indicate location (m). The lower topographic map is "Kobe-subu", 1 : 25,000 in scale, by the Geographical Survey Institute.

第1表 脇浜第2測線の探査諸元一覧表

Table 1 Field systems and parameters of the Wakinohama-2 seismic survey line.

発振装置	Impactor(JMI-200 II)
展開方法(方向)	Inline offset(South to North)
発振点間隔	5m
受振点間隔	5m
受振器、各受振点の地震計数	28Hz, 9/group
各発振点に対する標準受振点数	72
探査記録装置	Bison 9000A
受振記録サンプリング間隔	1ms
周波数ローカットフィルター	36Hz

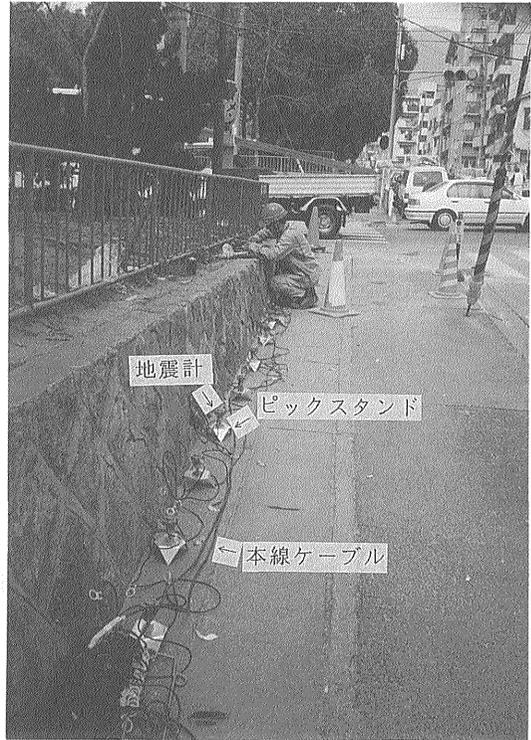


第2図 脇浜第2測線の探査状況(発振)

Fig. 2 Energy source (Impactor) used for the survey of Wakinohama-2 line.

P波を用い、インラインオフセットの展開方法で、海側から山側に向かって探査を行った。発振には、車重をかかけた状態で重錐を加速落下する装置(油圧インパクト)を用いた(第2図)。

発・受振点間隔は5mである。探査記録装置に48チャンネルのシステムを使用した。各発振地点に対して、発振点から受振点までの距離(オフセット)が5-240m及び125-360mの2種類のデータセットを収録した。それぞれのデータセットの垂直重合数は10である。処理の段階で同一の発振点の2つのデータセットのうちオフセットの同一のものを重合することによって、最終的に1発振点当り72チャンネルのデータとした。したがって標準水平重合数は36である。また、各発振点の垂直重合数は、オフセット125mから240mまでの区間が20、その他の区間は10になっている。



第3図 脇浜第2測線の探査状況(受振)

Fig. 3 Geophones and geophone stands used for the survey of Wakinohama-2 line.

受振器には、固有周波数28Hzの地震計を9個のグループで用い、それぞれ群設置した。探査測線の場所の大部分が舗装道路上であり、それらの場所では金属製の金具を用いて地面に設置した(第3図)。現場における周波数のローカットを36Hzとし、振源の発振特性及び受振器の固有周波数と合わせて、比較的高周波の記録を収録し、垂直方向の分解能が高い探査とした。

探査記録のサンプリング間隔はいずれも1msであり、記録長は3sである。

3. データ処理の方法

データ処理は共通反射点重合法による反射法弾性波探査の標準的な手順で行い、マイグレーション処理後の深度断面図作成までを行っている。主要な処理項目と主なパラメータを第2表に示す。その主な内容は以下の通りである。

初期処理の段階で、探査記録装置のフィルターの位相特性を補償する処理を行った。表面波等の除去は、主にデコンボリューションの処理による。これらの処理前後

第2表 脇浜第2測線のデータ処理の手順

Table 2 Seismic data processing of the Wakinohama-2 seismic survey line.

- 1.初期編集：不良データの除去、共通反射点編集
- 2.初期処理：
 - (イ)周波数フィルター10-160Hz
 - (ロ)位相特性処理（探査記録装置の位相特性を補償）フィルター長240ms[振幅補償 テスト]
- 3.振幅補償：
 - (イ)原記録より統計的に求めた振幅特性カーブを用いた補償
 - (ロ)自動振幅補償（各トレース毎、ゲート幅350ms）[デコンボリューション テスト]
- 4.デコンボリューション：1000ms、オペレータ長80ms、予測長さ5-12ms
- 5.表層静補正：観測記録の初動を屈折波トモグラフィー手法で解析した結果を用いる
- 6.標高静補正：各共通反射点区間内の平均標高と発・受振点の標高差を1600m/sの速度値を仮定して補正
- 7.速度解析：CVS法及びセンプランスをを用いた速度スペクトル法で解析
- 8.残留静補正：最大補正量を8msにした自動残留静補正
- 9.NMO補正・ミュート
- 10.重合
 - [マイグレーション テスト]
- 11.マイグレーション
 - [周波数フィルター テスト]
- 12.タイムバリエーション・フィルター
- 13.深度変換
- 14.重合後標高補正

の記録の例を第4図と第5図に示す。なお、これらの図は、共通発振点記録の中から、測線の各区間の記録の状態を示す代表的なものを選び並べて示したもの(100%断面図)である。

地表直下の不均質性による影響を小さくするための表層静補正に必要なデータは、観測記録の初動を読み取り、屈折波トモグラフィー手法で解析して求めた。この解析結果の断面図を図版Iに示す。なお、本図の格子間隔は1.3m、格子数は129×1344、最大受振距離は180mである。

発・受振点の高度差の静補正は、各共通反射点アンサンプルごとにその平均高度を基準とし、各発・受振点の高度差に表層速度1600m/sを仮定して行っている。このため、最終記録断面図の地面の位置は、このアンサンプルごとの平均的な高度の分布を示している。

これらの処理後の時間断面図を第6図に、またマイグ

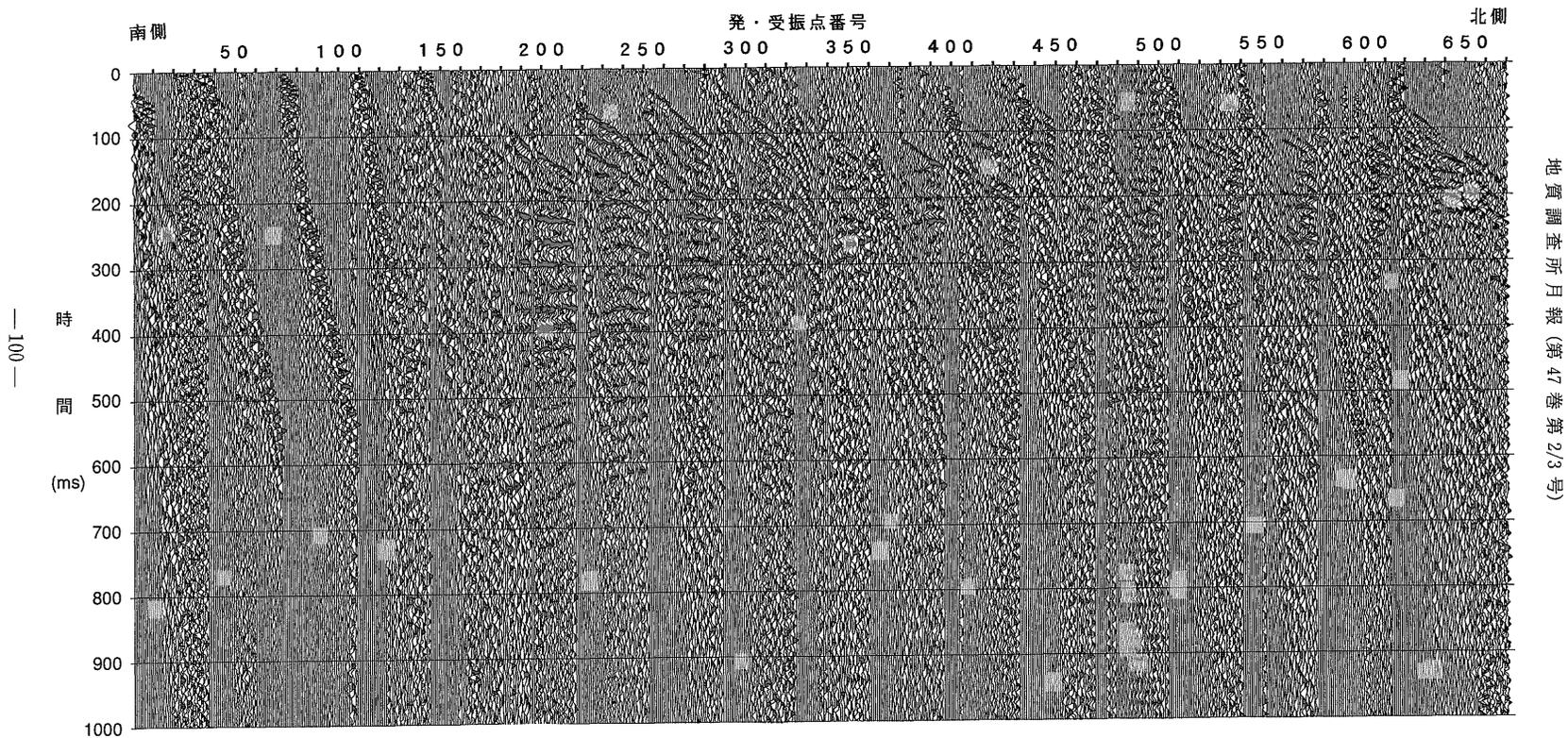
レーション後の深度断面図を第7図に示す。また、マイグレーション処理後の深度断面図を相対振幅カラー表示したものを図版IIに示す。

4. 探査結果

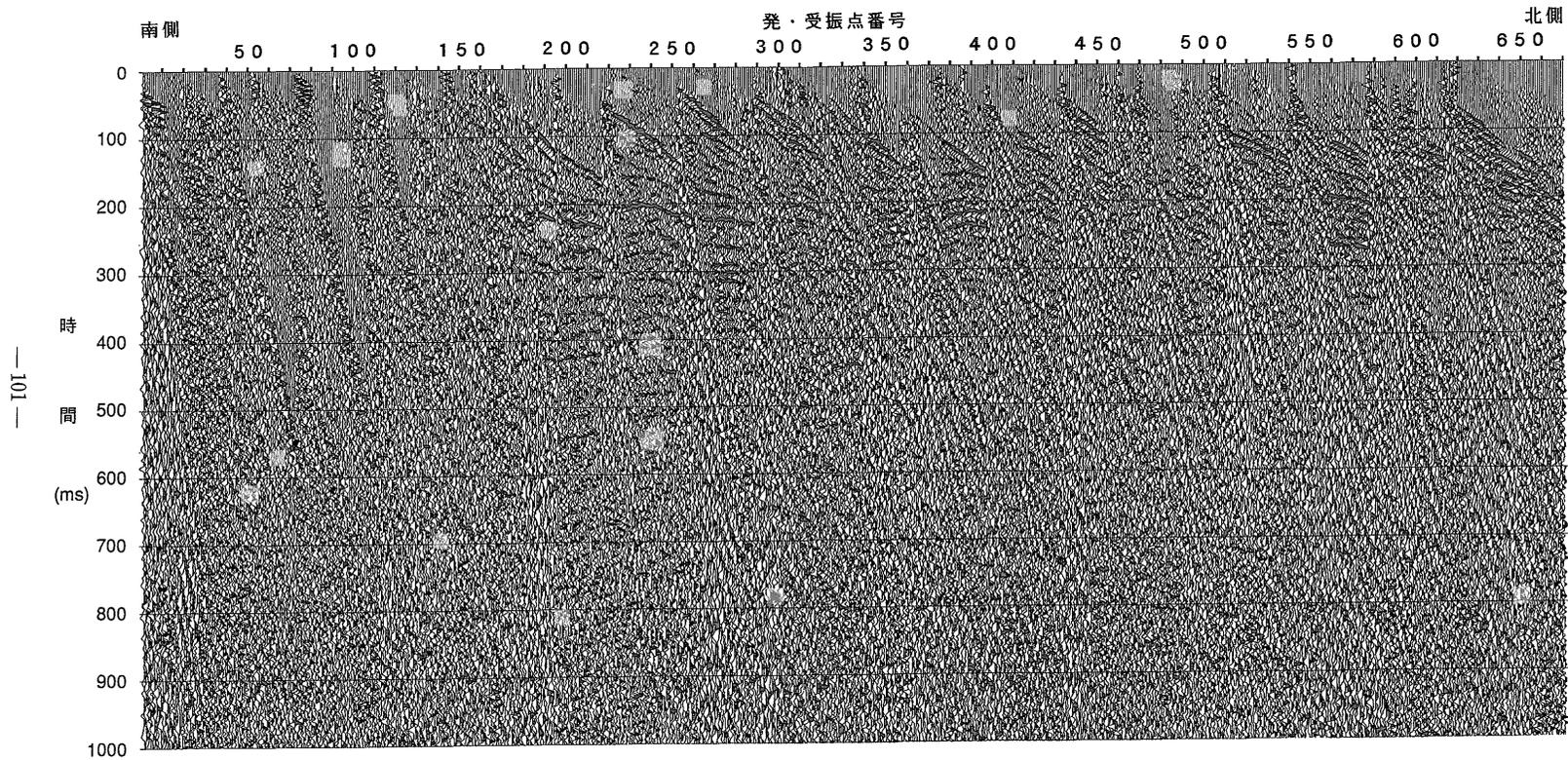
反射法弾性波探査結果の記録の状態及び反射面の分布形状について述べる。以下の記述において、地点の位置は第1発振地点を基準として共通反射点(共通反射中点、CMP: Common mid-point)間隔を2.5m間隔とした場合の測線上の水平位置である(第1図参照)。また、反射面等の標高については、本稿で示した深度断面図における値である。正確な深度については、今後ボーリング等によって確認する必要がある。

4.1 記録の状態

探査結果の時間断面図(第6図)において、反射面が



第4図 脇浜第2測線の観測記録 (共通発振点アンサンブル, 100%断面図).
 Fig. 4 An example of common shot point ensembles of the Wakinohama-2 seismic survey line.



第5図 脇浜第2測線の処理後の記録 (共通発振点アンサンブル, 100%断面図).

Fig. 5 An example of common shot point ensembles applied band pass filtering, phase correction and deconvolution.

認められる範囲は、600 m 地点を中心とする付近では、700 ms 以深まで達している。その北側では、浅い深度から反射面が不明瞭になる部分を挟み、徐々に浅くなる。1,500 m 地点付近で明瞭に反射面が認められる範囲は300 ms 付近までとなっている。一方、400 m 地点付近から南側の海岸付近では、地下浅部から反射面が不明瞭になっている。

これらについて、共通発振点アンサンプルの記録で検討すると、海岸付近を除いた範囲では反射波が明瞭に認められる(第4図)。これに対して、海岸付近では、相対的に表面波が強く、反射波は不明瞭になっている。各種の処理後の記録(第5図)では、反射波と解釈できる部分も認められるが、北側と比較すると全体的に不明瞭になっている。

4.2 反射面の分布形状

反射面の分布形状について、マイグレーション後の深度断面図(第7図、図版II)で検討する。比較的明瞭に認められる反射面のうち、例えば700 m 地点付近で標高-280 m 付近に認められる反射面は、南側に緩く傾斜して分布する。この傾斜は、JR 東海道線南側の850 m 地点付近から大きくなり、920 m 地点付近までの間で最も大きい。1,100 m 地点付近では、標高が-50 m 程度になる。この北側の王子公園南西端付近(1,200-1,300 m 地点付近)では、連続性の良い反射面が認められなくなる。この部分を挟んで、再び連続性の良い反射面が北側に分布するが、南側に分布する反射面との対応関係は、直接的にはわからなくなっている。

上記の反射面の傾斜は、測線中央部の中でも南端の部分(850 m 付近)で最も大きい。この深部は、反射面が不明瞭になっている北に傾斜した部分に対応している。この北に傾斜した部分では、両側で反射面は食い違っている。一方、より浅部への延長部分は、最も傾斜が大きな範囲を囲むように分岐し、地層の傾斜の境界部分となって地下浅部まで達している。

これらの極く浅い部分では、反射面は複雑に分布する。また、反射面の傾斜が大きくなっている中央部では、上記に述べた以外にも、反射面が不連続的に認められる部分がある。これらについては、極く浅い深度を対象とする探査によって検討する必要があり、現在調査を行っている。

一方、王子公園南西端付近の1,200 m 地点付近では、連続性の悪い反射面が全体としてハの字型を示す範囲に分布する。1,300 m 地点付近から北側では、深部の反射面は南側に傾斜が大きくなるように分布する。一方浅い部分では、ほぼ水平な反射面が認められる。この傾斜は地

表面の傾斜よりも緩くなっている。

なお、海岸付近の一部、100 m 地点付近に反射面が認められるが、北側の反射面との対応関係は明らかでなく、これらの間に不連続部分が分布する可能性があるが、先に述べたように共通発振点記録(第4図、第5図)によっても反射面が不明瞭であり、改めて検討する必要がある。

5. 反射法弾性波探査結果による地質構造と断層の活動

上記の反射面の分布形状等に基づいて、地質構造の特徴と断層の活動について検討する。

5.1 伏在断層の存在

探査を実施した大阪湾岸地域には、主として第四系からなる大阪層群が厚く分布する(藤田・笠間, 1983 など)。したがって反射断面図(第6図、第7図、図版II)に認められる反射面は、これらの堆積層の分布構造を示していると解釈でき、反射面のくい違い、あるいは浅部での折れ曲がりの主要なものはいずれも断層変位に伴うものと推定できる。

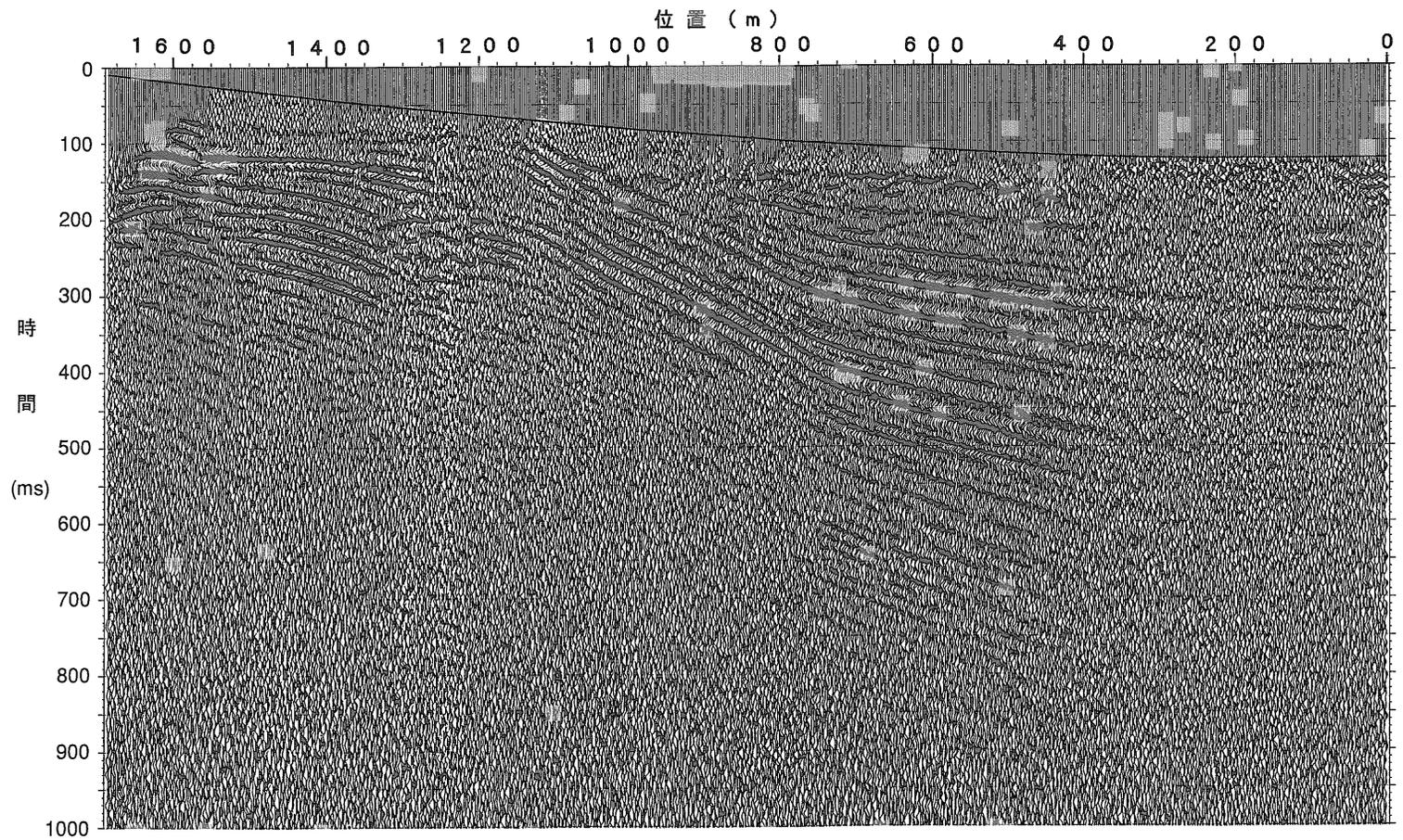
測線中央部の JR 東海道線付近における、反射面が折れ曲がり深部では反射面が不連続的になっている部分(海側の断層帯)、及び王子公園南西端付近の地表直下まで反射面が不連続的になっている部分(山側の断層帯)が主な断層帯として認められる。

これらの断層は表層の堆積物に覆われて地形等には明瞭には現われていない。一方、地下浅部の第四紀の地層を変位させている断層であり、いずれも伏在断層であるといえる。

5.2 海側の断層帯における変位の累積性とセンス

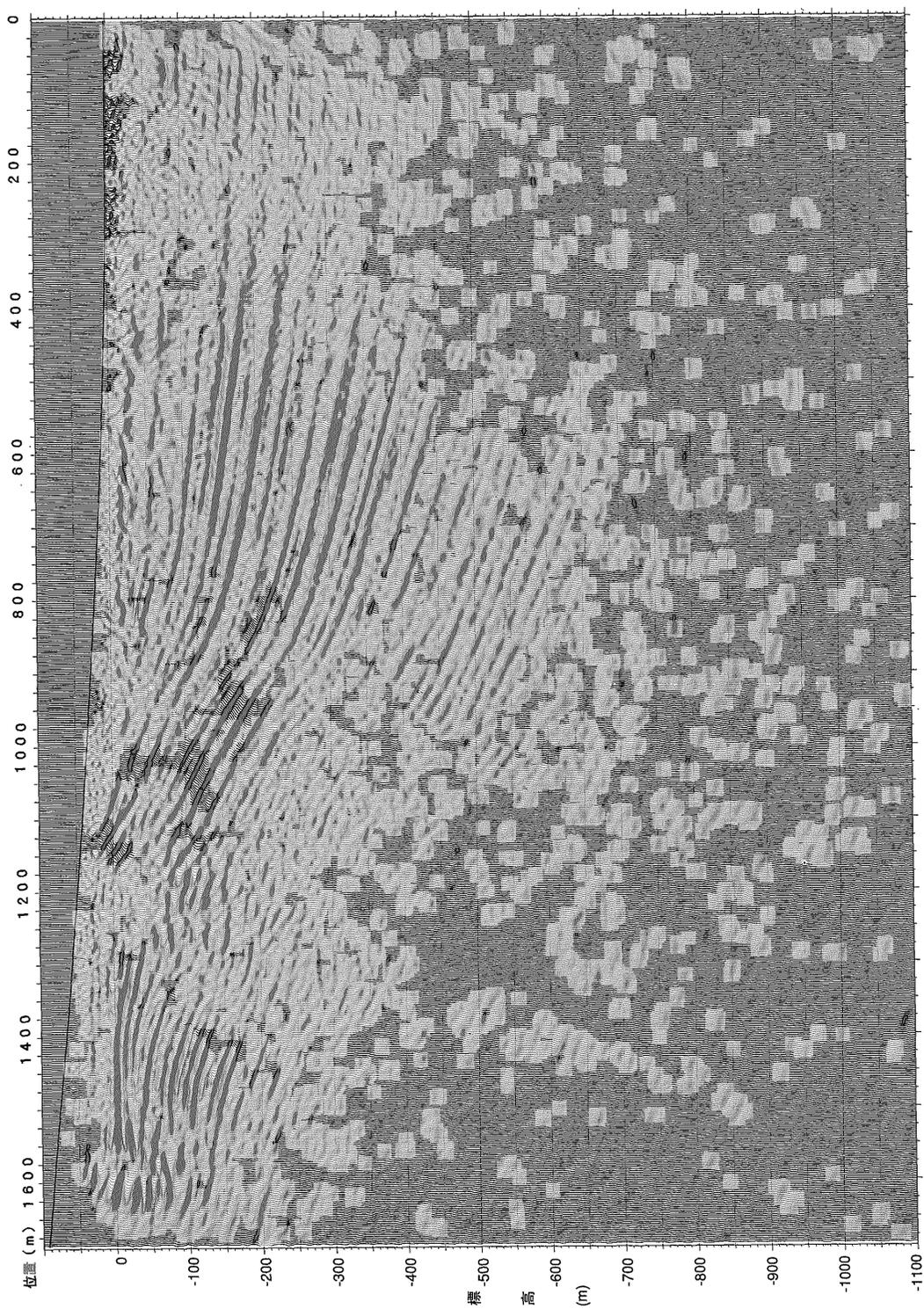
海側の断層帯付近を境界に、地層の厚さは全体的に変化し、反射面間の厚さは、傾斜が大きくなっている中央のブロック内で薄く、これらの断層の変位には累積性が認められる。これに対して断層面は北側に傾いていることから、これらの断層は逆断層と解釈できる。

上記のような地層の厚さの変化は、芦屋川測線の場合(遠藤ほか, 1996 b)と同様に、一部の反射面間の層厚変化に密接に関係している。本測線では、断層帯付近で地層が薄くなり尖滅(pinch out)する層準が3層準に認められる。それらの位置を第8図に示す。これらの層準が過去に大きな断層変位を生じた年代に対応している可能性がある。なお、これらの層準の芦屋川測線との関係については、遠藤ほか(1995 b)で検討している。



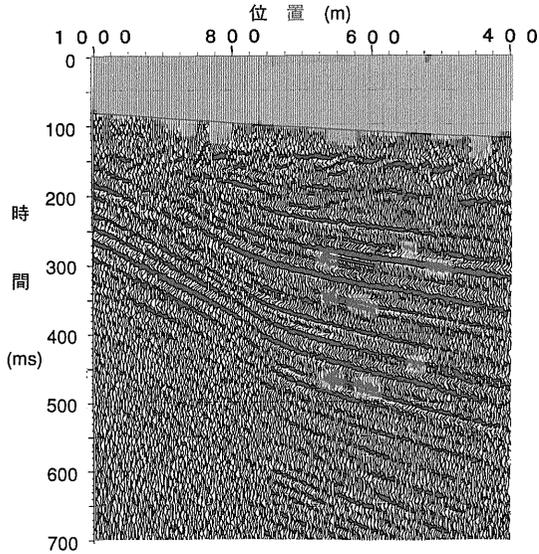
兵庫県神戸市における脇浜第2測線の反射法弾性波探査 (遠藤 ほか)

第6図 脇浜第2測線の探査記録の時間断面図
 Fig. 6 Time section along the Wakino-hama-2 seismic survey line.



第 7 図 脇浜第 2 測線のマイグレーション後の深度断面図

Fig. 7 Migrated depth section along the Wakinohama-2 seismic survey line.



第8図 脇浜第2測線の探査結果に認められる地層の尖滅。矢印で示す。

Fig. 8 Arrows show the horizons with pinch-out in the time section of the Wakinohama-2 line.

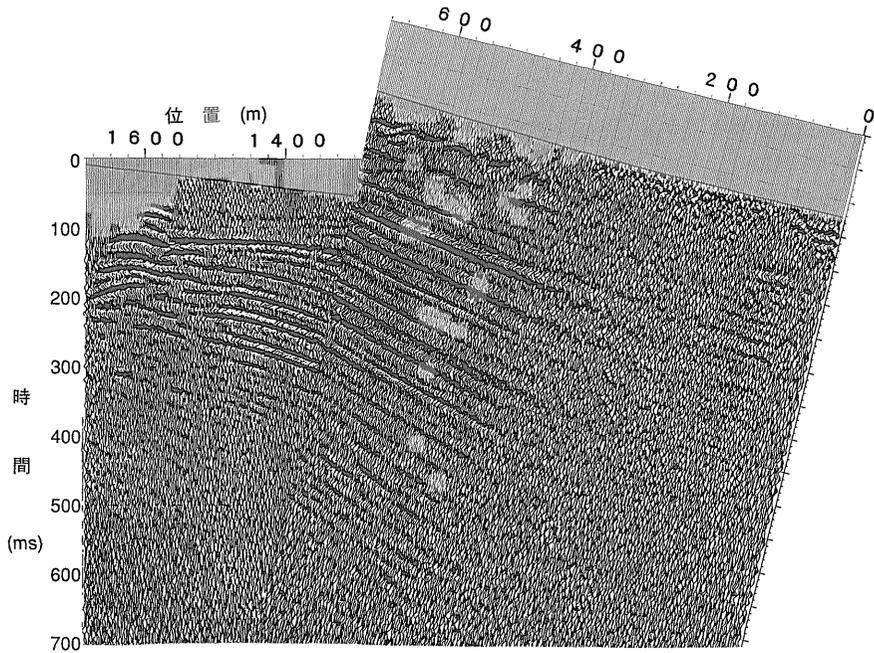
5.3 山側の断層帯の活動時期

一方、山側の断層帯では反射面が不連続的になっており、比較的幅の広い破碎帯が分布している可能性がある。このような幅の広い破碎帯の形成には、横ずれの変位を伴う活動が影響している可能性がある。

第9図は、山側の断層帯の北側の反射記録と海側の断層帯より南側の反射記録とを比較し、最もつながりが良い部分で張り合わせたものである。反射面の深度方向の分布パターンが、2箇所の断層帯を挟んだ両側でほぼ一致し、これらの地層は同様な堆積環境のもとで形成されたと解釈できる。したがって、山側の断層の活動による地層の大きな食い違いは、北部のブロックの極く浅い堆積物の形成年代以降に生じた可能性がある。この具体的な年代については今後ボーリング等によって明らかにする必要があるが、かなり新しい地質年代が予想される。

5.4 地質構造の特徴

探査記録の断面図に認められる地質構造には次のような特徴が認められる。これらの特徴は、芦屋川測線における探査結果と多くの点で共通する (遠藤ほか, 1995 b, 1996 b)。



第9図 脇浜第2測線の探査記録の北端付近と南端付近の記録を最も対応関係が良い位置で張り合わせて示す。

Fig. 9 Comparison of the reflection profiles of the each side of the Wakinohama-2 line.

その 1 つは、海側と山側の断層帯に挟まれたブロック内で地層の傾斜が大きく、その両側で傾斜が緩くなっていることである。このような構造は、全体として山側が隆起し、海側が沈降する逆断層の変位を示し、圧縮応力によるものと推定できる。本測線では、この傾動ブロックは山側で跳ね上がっている一方で、より北側の反射面は南側に傾斜しており、特に大きな圧縮応力が作用したことを示唆している。

また、断層を境に深部の反射面が不明瞭になっている点も特徴であり、地質構造を反映している可能性がある。海側の断層を境界に、北側の深部の反射面が全体的に不明瞭になっている。このことは、地層が大きく傾いて反射波が不明瞭になっている可能性と共に、この付近の地層が破碎されている可能性があることを示唆する。

海側の断層帯では、地層の変位が地下浅部に及んでいるのに対し、地層のくい違いが明瞭でない点も特徴である。この要因には、共通反射点重合法で、断層を挟んだ多くの異なった発振点の記録を重ね合わせているデータ処理方法にも関係している。また、浅部の地層が軟岩であり、弾性変形しやすいことや断層が浅部で分岐しやすいことが関係している。さらに、やや深部の地層が破碎されて、地下深部の変位あるいは応力がその全体的な変形に吸収され、断層面による地層の食い違いが生じている可能性があることを指摘できる。

6. 探査結果と被害の分布

脇浜第 2 測線付近の被害の分布と探査結果との対応関係を検討する。本測線沿いでは、北側の王子公園南西端付近の断層の位置から北側では、家屋の被害は著しく少なくなっている。この南側から被害が多くなり、家屋では中程度の被害が目につく。このような傾向は、低層建物の被害率の分布図(遠藤ほか, 1996 a)に認められ、この断層帯が被害集中地帯の北側の境界付近に位置していることを示している。

王子公園南西端付近から JR 線付近にかけて一部に比較的大きな鉄筋コンクリート造等の建物があり、大破する被害を被っている。また、JR 線付近から南側の断層周辺部は主に鉄筋コンクリート造あるいは鉄骨造の建物からなり、それらの多くが大破する被害を生じている。これらのことは、今回の被害の分布に伏在断層の分布が密接に関係していることを示唆する。

7. おわりに

本探査では、現場における周波数ローカットフィルターをやや高い値に設定するなど垂直分解能を高くするとともに、発振・受振点間隔を 5 m として水平方向の分解能も高くし、比較的浅い深度の地下地質を詳しく調査するように行った。地震後間もない時期であったが、標準重合数 36 の探査を行ったこともあり、極めて良好な記録を得ることができ、地下地質構造に関する詳細な情報が得られたと考えている。

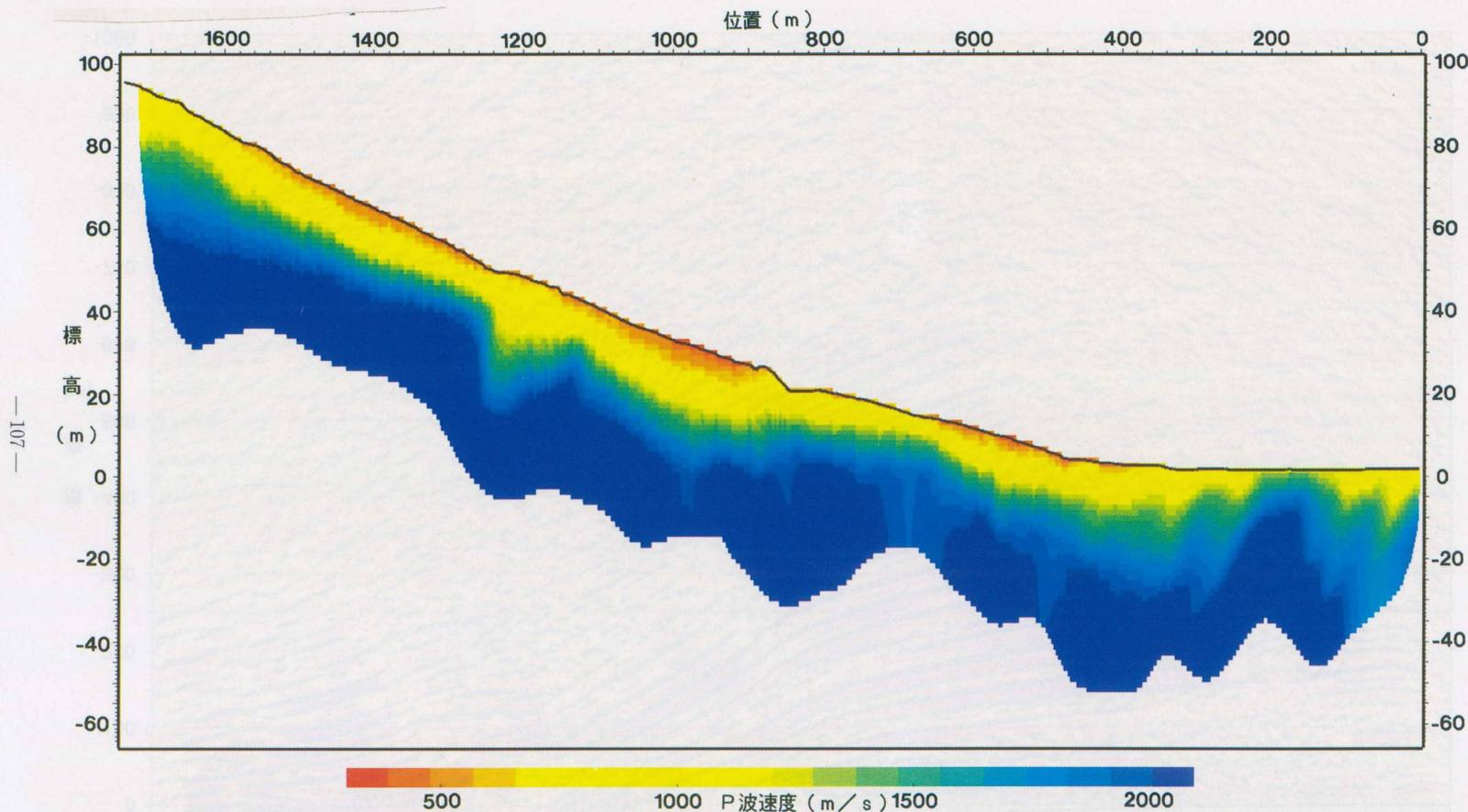
今回紹介した探査結果の断面図は、探査記録の速度解析結果から地層の速度を仮定して重合している。現在、この周辺において、ボーリングを掘削するなど、多くの項目の調査を行っている。これらの調査によって地層の弾性波伝播速度等に関するより詳しいデータを明らかにし、周辺で実施中の探査結果と合わせて検討し、改めて報告したいと考えている。

謝辞：今回の調査に際しては、兵庫県、神戸市、神戸市中央区役所及び灘区役所等の関係機関、及び地域住民の方々など、多くの関係者の協力を得ました。記して深く感謝いたします。

文 献

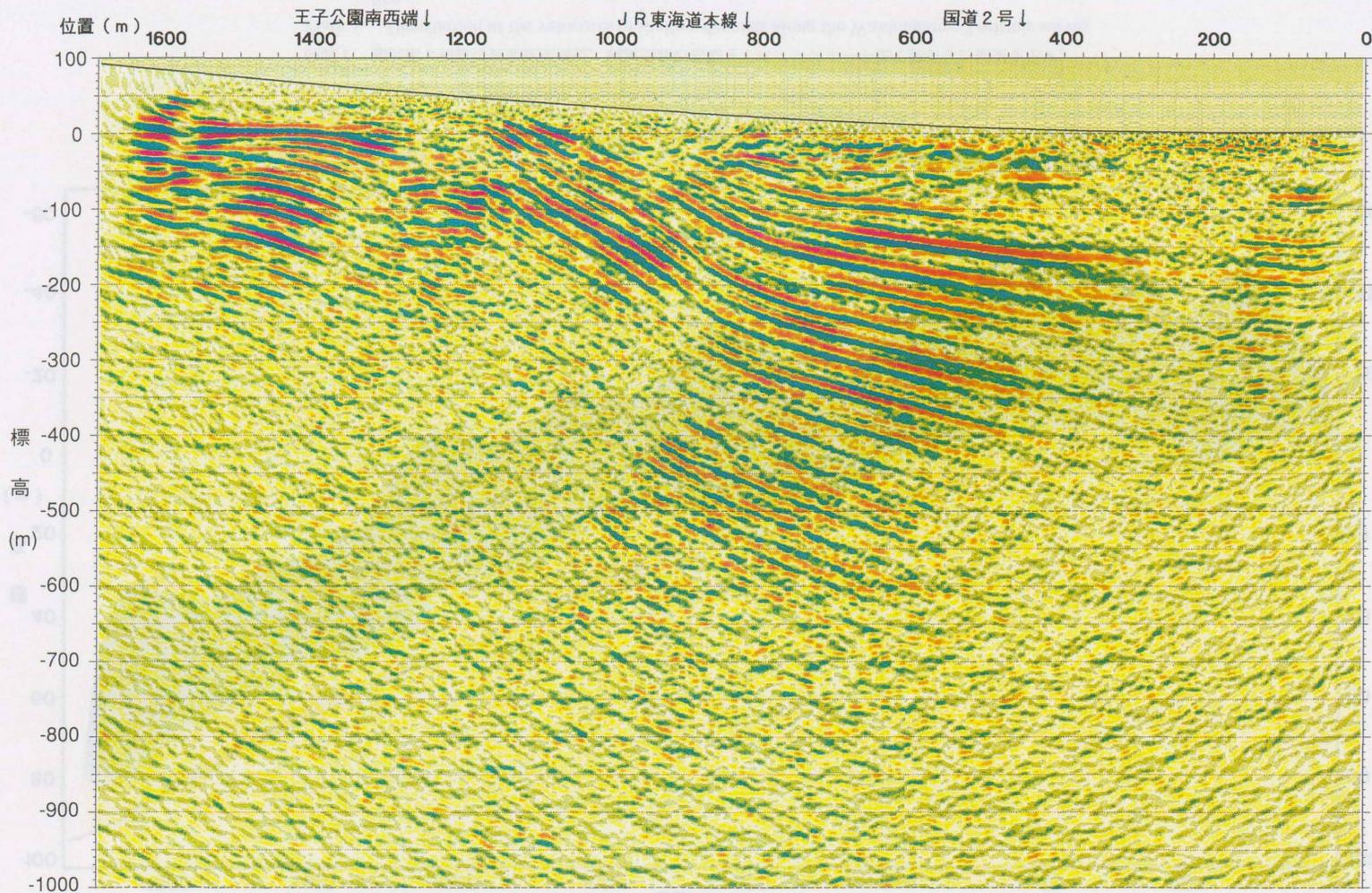
- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・渡辺和明・
 卜部厚志(1995 a) 兵庫県南部地震による阪神
 地域の被害と伏在断層の分布, 日本応用地質学
 会「阪神大震災」中間報告会予稿集, p.55-71.
 —————
 —————(1995 b) 兵庫県神戸市及び芦屋市に
 おける伏在断層と基盤構造, 物理探査,
 vol.48, p.439-450.
 —————
 —————村田泰章・卜部厚志(1996 a) 平成 7 年兵庫県
 南部地震による神戸市・芦屋市・西宮市におけ
 る家屋の被害分布, 地調月報, vol.47, p.67-
 77.
 —————
 —————阿蘇弘生・是石康則・
 江尻寿延(1996 b) 兵庫県芦屋市における芦屋
 川測線の反射法弾性波探査, 地調月報,
 vol.47, p.79-94.
 藤田和夫・笠間太郎(1983) 神戸地域の地質, 地域地
 質調査報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査
 所, 115 p.

(受付: 1995 年 11 月 30 日; 受理: 1996 年 1 月 30 日)



図版 I 脇浜第2測線の表層速度構造。観測記録の初動をトモグラフィー手法で解析した結果を示す。

Plate 1 Distribution of the velocities in shallow deposits along the Wakinohama-2 seismic survey line.



図版II 脇浜第2測線のマイグレーション後の深度断面図

Plate 2 Migrated depth section along the Wakinohama-2 seismic survey line represented by a variable density mode.